引用格式：李宏伟, 郑琪, 王建林, 等. 发展长穗偃麦草，建设“滨海草带”. 中国科学院院刊, 2023, 38(4): 622-631

Li H W, Zheng Q, Wang J L, et al. Industrialization of tall wheatgrass for construction of “Coastal Grass Belt”. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(4): 622-631

发展长穗偃麦草，建设“滨海草带”

李宏伟[1] 郑 琪[1] 王建林[1] 孙宏勇[2] 张可心[1] 方红曼[1] 邢雪荣[1] 杨维才[1]
曹晓风[1] 刘小京[2] 景海春[3] 种 康[3] 李振声[1*]

1 中国科学院遗传与发育生物学研究所 北京 100101
2 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022
3 中国科学院植物研究所 北京 100093

摘要 长穗偃麦草是一种多年生冷季型饲草，具有耐盐碱、耐涝、耐旱和生物量大等特点。20 世纪 50 年代引入我国后，长期用作小麦远缘杂交的野生亲本。尽管 20 世纪 80—90 年代也曾引种，但至今在我国未实现大面积种植，也没有审定品种。2020 年，李振声提出利用环渤海地区的滨海盐碱荒地建设“滨海草带”的设想，为我国长穗偃麦草产业化描绘了应用前景。文章介绍了我国长穗偃麦草的产业化背景、主要生物学特性、国内外产业发展历程及现状，并提出了关于我国长穗偃麦草产业化发展的建议：通过建立长穗偃麦草“滨海草带”示范样板、商品草生产示范基地和养畜示范场，带动长穗偃麦草产业发展；培育龙头公司，形成“龙头公司+专业合作社/种植大户”的完整产业链。此外，还就加强基础研究、加快自主品种选育、实现种子产业化，加大政策资金及科技人才投入等方面提出了建议。“滨海草带”不仅可弥补我国优质饲草缺口，还可提供生态屏障，保护生态环境。

关键词 长穗偃麦草，盐碱地，滨海草带，粮食安全，饲料粮安全

1 我国长穗偃麦草产业化的时代需求

随着我国经济社会发展和人民膳食结构变化，粮食安全已从口粮安全逐渐演变为饲料粮安全[1-3]。2022 年我国玉米、水稻、小麦的种植面积为 4.31×10^5、2.95×10^5 和 2.35×10^5 km^2，分别比 2007 年增加了 43.45%、1.65% 和 −1.02%。2020 年大豆进口 1.0×10^8 t 比 2007 年增加了 2.25 倍，尽管 2021 年回

*通信作者

资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA26040105），中国科学院重点部署项目（KFZD-SW-112），中国科学院科技服务网络计划（STS计划）（KFJ-STS-ZDTP-053）

修改稿收到日期：2023年3月19日

落至 9.65×10^7 t，也比 2007 年增加了 2.23 倍①。2016—2020 年期间，年均进口干草 1.71×10^6 t[3]。我国牛羊肉、奶及奶制品的进口总量持续增加。2021 年牛羊肉、奶及奶制品的进口总额逼近 2 000 亿元人民币②。

农业农村部《“十四五”全国饲草产业发展规划》提出，要确保牛羊肉和奶源自给率分别保持在 85% 左右和 70% 以上的目标，对优质饲草的需求总量将超过 1.2×10^8 t，尚有近 5.0×10^7 t 的缺口③。根据目前的平均单产水平推算，未来需增加至少 3.7×10^4 km^2的优质饲草种植面积才能弥补缺口。我国人工种植的 20 余种饲草中，紫花苜蓿（*Medicago sativa*）、青贮玉米（*Zea mays*）和燕麦（*Avena sativa*）的种植面积和产量占比分别为 71.6% 和 94.2%。种植区域主要涉及甘肃、内蒙古、青海、河北、宁夏等省份[4]。该区域面临水资源不足与土地资源匮乏的双重压力，饲草种植面积增加的潜力有限。在中低产田开展“草田轮作”发展草牧业，生产饲草的同时又提高了土壤肥力[2]。第三次全国国土调查显示，2021 年我国耕地面积 1.28×10^6 $km^2$④。据农业农村部 2020 年公报，全国耕地中 2/3 为中低产田⑤。长期来看，中低产田仍是我国粮食安全的重要保障。例如，自 2013 年“渤海粮仓科技示范工程”实施以来，环渤海地区 2.67×10^4 km^2 中低产田 5 年实现粮食增产 1.0×10^7 t[5]。基本国情决定了我国优质饲草生产应避免“草粮争地”[3,6]。

我国有约 7.80×10^5 km^2 边际土地，其中包括尚未开发的耕地后备资源 5.67×10^5 km^2 和现有低等耕地 2.13×10^5 km^2[7]。边际土地的土壤障碍因子突出，粮食产量低、种植效益差、生态脆弱。盐碱地是边际土地的重要组成部分，我国盐碱障碍因子的边际土地有 1.20×10^5 km^2。其中，环渤海地区的山东、河北、天津等地有 1.20×10^4 km^2 滨海盐碱地[7]。该区域年降雨量 500—600 mm，有利于发展草牧业。利用滨海盐碱地种植耐盐碱饲草建立“滨海草带”，可弥补优质饲草缺口、保障我国粮食安全和保护生态环境[3,5,6,8]。采用适当的栽培技术，在含盐量 0.2%—0.4% 的轻中度盐碱地上种植粮食作物还可获得一定的产量。然而，在含盐量 >0.4% 的中重度盐碱地上粮食产量往往低而不稳，但发展耐盐饲草潜力巨大[3,6,9]。截至 2021 年我国已审定了 651 个草品种[10]，但耐盐品种不足 20 个，适合滨海盐碱地的耐盐耐涝品种更是少之又少[3]。因此，耐盐碱饲草品种是建设“滨海草带”的主要瓶颈问题[3,6]，而长穗偃麦草（*Elytrigia elongata*）是符合条件的优选草种之一。

2 长穗偃麦草主要生物学特性

长穗偃麦草是一种丛生的多年生冷季型饲草，为禾本科小麦族偃麦草属植物。原产于欧洲东南部、小亚细亚和俄罗斯南部等，在美国、加拿大、澳大利亚、阿根廷和欧洲部分国家大面积种植，常用作建立盐碱地牧场、土壤修复或能源植物[5]。20 世纪 50 年代引入我国后，长期用作小麦遗传改良的重要基因资源。1980—1990 年，我国曾从苏联、美国和加拿大等国多次引种用于防风固沙和饲草试验[11]，但至今鲜有大面积种植的报道[5,12]。

（1）耐盐碱、耐涝、耐旱。长穗偃麦草是最耐盐的饲草之一[13-15]，可耐 750 mmol/L 的氯化钠胁迫（相当于海水盐浓度的 1.25 倍）[14,16]。其耐盐能力强于无芒雀麦（*Bromus inermis*）、多年生黑麦草（*Lolium*

① 国家统计局 . 主要农作物播种面积 . (2022-12-30)[2023-02-01]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01.
② 中华人民共和国海关总署 . 2021 年度进口数据 . (2022-12-30)[2023-2-1]. http://stats.customs.gov.cn/.
③ 中华人民共和国农业农村部 . “十四五”全国饲草产业发展规划 . (2022-02-16)[2023-03-19]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/01/content_5676205.htm.
④ 新华社 . 第三次全国国土调查主要数据公报 . (2021-08-26)[2023-03-19]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-08/26/content_5633490.htm.
⑤ 中华人民共和国农业农村部 . 2019 年全国耕地质量等级情况公报 . (2020-05-06)[2023-03-19]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2020/202004/202005/t20200506_6343095.htm.

perenne）、野大麦（*Hordeum brevisubulatum*）[17]、狗牙根（*Cynodon dactylon*）、高羊茅（*Festuca arundinacea*）、虎尾草（*Chloris gayana*）[18]及偃麦草属其他物种如偃麦草（*Elytrigia repens*）等[19]。本文的前期研究发现，长穗偃麦草适合在含盐量0.4%—1.0%的盐碱地种植[9,20]。长穗偃麦草适合在pH值5.3—10.0的范围生长，最适宜pH值为7.5—9.0 [21,22]。长穗偃麦草较为耐涝[23-25]，即使海水淹没30 d，无性繁殖的根茎依然可以再生[26]。长穗偃麦草除耐盐碱、耐涝外，还表现抗旱[27-29]，可在干旱半干旱地区生长[30]。

（2）生物量大。长穗偃麦草是冷季型饲草中生物量最大的一种饲草[31,32]。在非盐碱地上，开花期的长穗偃麦草鲜草产量超过3 000 t · km^{-2}，最高接近4 000 t · km^{-2}，干物质产量达1 300—2 500 t · km^{-2}[21,33]。在半干旱地区盐碱地上的干物质产量达500—800 t · km^{-2}[34]。盆栽试验显示，雨涝条件下长穗偃麦草的干物质产量比玉米高4.2倍[35]。在我国内蒙古黄灌区含盐量0.3%—0.9%、pH值7.5—10.1的低湿盐碱地上建植率达60%—80%，干草产量为675—750 t · km^{-2}[11]。在黄河三角洲地区含盐量0.2%—0.9%、pH值7.8—9.0的中重度盐碱地上，鲜草产量达1 800—2 250 t · km^{-2}。

（3）营养品质好。长穗偃麦草饲草品质好，适合用作牛羊的优质粗饲料[5,36,37]，营养品质主要取决于收获时期。以粗蛋白含量为例，苗期和再生期达20%以上、拔节期14%—16%，抽穗—开花期10%左右[38-40]。抽穗期的体外干物质消化率为41.8%—54.8%[38]，中性洗涤纤维含量为53.2%—56.3%，酸性洗涤纤维含量28.6%—30.2%，粗脂肪含量3.4%—3.9%，碳水化合物含量1.9%—2.4%[41]。

（4）根系发达，可改良盐碱地。长穗偃麦草根系生物量大[42]，可吸收土壤和浅层地下水中的钠离子[43]。长穗偃麦草耐重金属，可利用富含硼[44]和硒[45]的排碱沟咸水灌溉，也可修复重金属污染的土壤[46-48]。长穗偃麦草根系周围产生的黑色“腐殖质”与土壤中的无机胶体、黏土矿物、细沙等黏合在一起，形成“微团粒结构”。多年生特性可减少土壤耕作和水土流失，增加土壤有机质、保护生态环境[49]。经长穗偃麦草改良后的盐碱地可改种粮食作物。

（5）适生条件。长穗偃麦草适合在年平均气温5℃—20℃、日平均气温2℃—25℃的区域生长[22]，可耐日平均温度30℃—35℃的高温和 −35℃的低温[21]。长穗偃麦草最适宜在年降水量350—600 mm的区域种植[22]。一般可生长10—15年[21]，甚至25年[50]，自然环境下也有生长32年的报道[26]。考虑到不与粮争地，欧洲研究人员建议在半干旱的边际土地上发展长穗偃麦草[32,51]。雨养旱作的边际土地上，长穗偃麦草的经济效益优于黑麦（*Secale cereale*），生产耗能仅为黑麦的40%，每年长穗偃麦草牧场的全球变暖潜能值（GWP）为−190 t CO_2 · km^{-2}，而黑麦的为160 t CO_2 · km^{-2}[49]。在我国，可利用环渤海地区含盐量0.4%—1.0%的滨海盐碱荒地发展长穗偃麦草，建设“滨海草带”。

3 国内外长穗偃麦草产业发展历程及现状

自1937年美国认证第一个长穗偃麦草品种Largo以来，全世界认证和推广了10多个长穗偃麦草品种[5,9]。目前，这些品种在美国、加拿大、澳大利亚、阿根廷及欧洲部分国家大面积种植。在美国，长穗偃麦草牧场主要分布在北部大平原及西部山区。其中，Platte品种主要分布在中部平原，Alkar品种主要分布于西部，Jose品种主要在南部平原推广[52]。仅Jose品种在美国俄克拉荷马、得克萨斯和新墨西哥等3个州的种植面积超过1 000 km^2[50]。加拿大种植的唯一品种是1966年育成的耐寒品种Orbit，适合于加拿大所有的盐渍土地[53,54]。在澳大利亚，从1968年开始长穗偃麦草种子商业化生产，20世纪80年代大面积推广，90年代年产种子30—70 t[55]。目前在澳大利亚南部，如

新南威尔士、维多利亚、西澳大利亚和南澳大利亚等州均有长穗偃麦草牧场。在阿根廷，从20世纪60年代引入至今已认证和推广了3个品种。在阿根廷萨拉多河流域，长穗偃麦草牧场达1.0×10^4 km^2[56]。在欧洲，长穗偃麦草除用作牧场外，在半干旱的边际土地常用作替代玉米和黑麦的能源植物[21,34,35]。全球有超过20家牧草种子公司销售长穗偃麦草种子，其中大多数是美国公司。在国外已形成长穗偃麦草种子生产、销售与饲草利用的完整产业链。

2000—2022年，国际期刊发表的89篇长穗偃麦草饲草相关研究论文中，美国、澳大利亚、阿根廷和欧洲（包括了波兰、西班牙、德国、捷克、匈牙利、保加利亚和葡萄牙等）作者发表论文数量占比分别为33.0%、12.4%、10.3%和28.9%。同期，我国仅在国际期刊发表4篇（占比4.1%）。我国相关研究论文多发表于国内期刊，2000年以来，在国内期刊发表相关论文44篇。

2021年国家林业和草原局将长穗偃麦草列入我国主要草种目录。尽管长穗偃麦草引入我国近70年，但至今未形成产业，无审定品种和配套栽培技术。作为饲草利用的长穗偃麦草为十倍体（$2n=10x=70$），遗传基础复杂且杂合度高，重要饲草性状如产量、品质及抗逆等方面的基础研究还很薄弱[9]。

4 关于我国长穗偃麦草产业化的建议

4.1 加强基础研究、加快自主品种选育，实现种子产业化

*（1）加强基础研究，建立分子设计育种技术体系。*目前，全世界范围内尚未系统开展长穗偃麦草分子育种研究，各国采用的育种方法还是传统的群体选择，长穗偃麦草的分子育种技术远远落后于稻麦等粮食作物[9]。因此，建议我国加强基础研究，开展长穗偃麦草种质资源筛选、基因组结构与序列变异研究，发掘重要饲草性状（如耐盐碱、高产、优质、适口性等）的分子模块和功能基因、研发组织培养、遗传转化、基因编辑等技术，形成长穗偃麦草分子设计育种技术体系，实现长穗偃麦草育种研究弯道超车。

*（2）开展品种选育，加快品种审定。*针对长穗偃麦草育种周期长的特点，建议开展育种方法研究，提高育种效率。长穗偃麦草需要经过低温春化和长日照才能正常开花。通过研究春化和光周期条件，建立加速育种方法。开展花药培养研究，建立单倍体诱导加倍技术体系。结合大田单株/群体混合选择、苗期耐盐鉴定、异地选择、生殖隔离、长光照处理及加速育种方法等，选育耐盐高产品种。长穗偃麦草育种的选择指标应聚焦于产量（再生性、耐刈割）、品质（粗蛋白含量、消化率、适口性）和抗逆（耐盐碱、耐涝、耐旱等）等性状。“小麦×长穗偃麦草”的杂种F_1与长穗偃麦草一样保持多年生特性，但发育快、生物量高[57]。如果通过基因编辑技术解决杂种F_1无融合制种问题，未来有望作为新型耐盐碱饲草取代长穗偃麦草。自2012年起，中国科学院遗传与发育生物学研究所李振声研究团队在河北曹妃甸、南皮、海兴及山东东营等地开展长穗偃麦草品系鉴定，已筛选到耐盐高产品系C2（暂定名“中偃1号”）[41]。建议国家草品种审定部门开辟绿色通道，在“滨海草带”的目标区域增设长穗偃麦草品种区域试验点，加快品种审定，争取早日实现我国长穗偃麦草品种“从0到1”的突破。采用分子设计育种技术体系，在现有种质资源筛选的基础上，培育更耐盐（含盐量1.0%—1.5%）的高产优质新品种，不断实现品种更替。

*（3）建立标准化种子生产示范基地，实现种子产业化。*根据长穗偃麦草种子轻的特点，改造种子收获机械，减少种子损失，提高种子脱粒效果。改造或研发适合长穗偃麦草种子的清选机。研究长穗偃麦草种子包衣技术，提高种子萌发率。以种子产量和质量为目标，研究制定长穗偃麦草种子生产的田间栽培管理与种子收获、清选与加工的技术规程。与有关种子

公司合作，在环渤海地区建立标准化种子生产示范基地，实现种子生产、清选、包衣与销售等市场导向的长穗偃麦草种业产业化发展。

4.2 加快试验示范、带动产业发展、保护生态环境

（1）*开展区域适应性研究，建立长穗偃麦草“滨海草带”示范样板。*研究中重度盐碱地长穗偃麦草高产群体的水肥需求规律、咸水灌溉技术等，制定全程机械化低成本的高产栽培技术规程。兼顾产量与品质，因地制宜确定最佳收获时期与刈割技术。研发适合长穗偃麦草的青贮菌剂及青贮饲料调制技术[58]，确定青干草晒制的技术条件，制定长穗偃麦草制草的技术规程。在“滨海草带”目标区域开展多年多点试验，进行适应性研究。确定重点示范推广区域，与养殖企业、草业公司、合作社/种植大户等合作，建立百亩/千亩长穗偃麦草“滨海草带”示范样板。推动形成“牛场/羊场+草业公司+种植大户”的种草、制草与用草的长穗偃麦草产业化雏形。例如，在山东东营实现黄河口滩羊产业、肉牛/奶牛产业与长穗偃麦草产业融合，通过召开现场示范观摩会、技术培训和新闻宣传等展示高产栽培技术效果，青干草/青贮饲料草产品及牛羊饲喂效果，为长穗偃麦草产业化应用提供范式，带动长穗偃麦草产业发展。

（2）*以市场需求为导向生产优质饲草，建立商品饲草生产示范基地与养畜示范场。*以牛羊对优质饲草的营养需求为导向，建立千亩规模长穗偃麦草商品草示范基地，生产优质饲草产品（青贮饲料、青干草、草粉、草颗粒等）。依托规模养殖场，根据出肉率、肉质风味品质和产奶量等指标，科学评估长穗偃麦草的饲喂效果和经济效益。根据不同发育阶段牛羊对营养的需求特点，引入长穗偃麦草粗饲料，设计精准日粮配方。与规模养殖场合作，建立长穗偃麦草养畜示范场，带动长穗偃麦草饲草规模化应用。另外，还可利用长穗偃麦草盐碱地牧场放牧，实现生态养殖。

（3）*培育龙头企业，养殖业驱动长穗偃麦草产业链融合。*按照“种养结合、为养而种、以养定种”的原则，依照养殖产业的布局和规划，以养殖场为核心，支持“龙头公司+专业合作社/种植大户”的产业链融合发展。一方面鼓励有条件的大型养殖场、家庭农场利用自有盐碱地建立长穗偃麦草牧场，保障饲草自给自足；另一方面培育和支持龙头公司紧密联系供需双方，实现长穗偃麦草饲草订单化生产。将种草任务交给专业合作社和/或种植大户，利用中重度盐碱荒地，化零为整，建立饲草基地。龙头公司重点开拓饲草市场，购置饲草生产所需的机械设备，与专业合作社/种植大户按照保护价签订协议，组建专业技术队伍，提供种子、肥料及“种、管、收、售”等一条龙技术服务。龙头公司在向养殖企业提供饲草产品的同时，也可消纳养殖业产生的有机肥，在保障草食畜牧业健康可持续发展的同时，实现种养循环。

（4）*建立“滨海草带”生态屏障，保护生态环境。*滨海盐碱荒地属边际土地，生态环境脆弱[7]。因滨海地区土壤含盐量高，当地城市道路绿化常用的方法是更换为含盐量低的土壤后栽种绿化植物。这种方法成本高，不适宜大规模应用。同样由于土壤含盐量高，海堤和河堤的野生植物根系浅，雨季经常面临坡堤冲垮的问题，造成水土的严重流失。这导致日常工程维护成本高，效果也不理想。长穗偃麦草可以利用原土或仅更换浅层土壤就能在该地区进行城市道路绿化。长穗偃麦草根系庞大、耐盐碱、耐水淹，适合用于防护海堤、河堤[26]。建议在滨海盐碱地区，将长穗偃麦草用于城市道路绿化和海/河堤防护，发挥其生态效益。

4.3 加大政策资金、科技人才投入

（1）*加大社会宣传，转变思想观念。*在农区，人工种草意识淡薄，“重粮轻草”的观念根深蒂固。因此，建议有关部门不断加大社会宣传，引导政府、企业、专业合作社/农户树立“种草即种粮”的观念。引

导专业合作社和种植大户像种粮一样对待种草，学习和采用科学的栽培技术（追肥、浇水、适期收获等）种好草。长穗偃麦草“滨海草带”的经济效益建立在规模化和机械化的基础上。建议引导专业合作社/种植大户开展规模化种植，与龙头公司和养殖企业、草业公司合作，进行订单式生产。

（2）科学规划种草用地、提供政策资金支持。为实现饲草生产“不与粮争地”，长穗偃麦草“滨海草带”定位于含盐量0.4%—1.0%的盐碱地。实践中，粮食亩产量50 kg以下的中重度盐碱地扣除种子后对国家粮食产量的贡献微乎其微，但发展饲草潜力巨大。建议各级政府有关部门因地施策，科学规划种草用地，提高盐碱地利用效率。国家实施“振兴奶业苜蓿发展行动”和“粮改饲”以来，苜蓿和青贮玉米的种植面积快速增加，促进了草牧业发展。建议国家扩大“粮改饲”适用于长穗偃麦草等耐盐碱饲草。“滨海草带”可在当前饲草产量的基础上，变盐碱荒地为人工草地增加优质饲草面积，弥补我国优质饲草缺口。建议国家适时出台政策鼓励和引导社会资本建设“滨海草带”、适时启动“滨海草带”补贴，支持发展长穗偃麦草等耐盐碱饲草。

（3）培养长穗偃麦草人才队伍。长期以来，我国长穗偃麦草研究多集中于与小麦的远缘杂交方面。然而，作为饲草利用的研究力量弱而散，更缺少产业技术人才。建议国家培养和引进长穗偃麦草研究领域的人才，形成攻关团队，从基因组、重要饲草性状基因分子模块发掘、遗传转化、基因编辑等方面探索建立分子设计育种技术体系，开展长穗偃麦草品种选育，与龙头公司、养殖企业合作实现长穗偃麦草产业化应用，加快建设“滨海草带”。

参考文献

1 任继周, 李发弟, 曹建民, 等. 我国牛羊肉产业的发展现状、挑战与出路. 中国工程科学, 2019, 21(5): 67-73.
Ren J Z, Li F D, Cao J M, et al. Development status, challenges, and solutions of China’s beef and mutton industry. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2019, 21(5): 67-73. (in Chinese)

2 高树琴, 王竑晟, 段瑞, 等. 关于加大在中低产田发展草牧业的思考. 中国科学院院刊, 2020, 35(2): 166-174.
Gao S Q, Wang H S, Duan R, et al. How to develop grass-based livestock husbandry in areas of low- and middle-yield fields. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(2): 166-174. (in Chinese)

3 胥伟华, 王建林, 刘小京, 等. 建设“滨海草带”的科技缘由、内容与对策. 中国科学院院刊, 2022, 37(2): 238-245.
Xu W H, Wang J L, Liu X J, et al. Scientific and technological reasons, contents and corresponding policies of constructing “Coastal Grass Belt”. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(2): 238-245. (in Chinese)

4 高菲, 王铁梅, 卢欣石. 2021年我国商品饲草生产形势分析与2022年趋势展望. 畜牧产业, 2022, (3): 32-37.
Gao F, Wang T M, Lu X S. Analysis of commercial forage production situation in 2021 and trend outlook in 2022. Animal Agriculture, 2022, (3): 32-37. (in Chinese)

5 李宏伟, 郑琪, 李滨, 等. 一种耐盐碱牧草——长穗偃麦草研究进展. 草业学报, 2022, 31(5): 190-199.
Li H W, Zheng Q, Li B, et al. Progress in research on tall wheatgrass as a salt-alkali tolerant forage grass. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(5): 190-199. (in Chinese)

6 王甜甜, 曹丽雯, 刘智全, 等. 黄河三角洲滨海草带建设的饲草基础生物学问题. 植物学报, 2022, 57(6): 837-847.
Wang T T, Cao L W, Liu Z Q, et al. Basic biology of forage grass for constructing Coastal Grass Belt in Yellow River Delta. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(6): 837-847. (in Chinese)

7 曹晓风, 孙波, 陈化榜, 等. 我国边际土地产能扩增和生态效益提升的途径与研究进展. 中国科学院院刊, 2021, 36(3): 336-348.
Cao X F, Sun B, Chen H B, et al. Approaches and research progresses of marginal land productivity expansion and ecological benefit improvement in China. Bulletin of Chinese

Academy of Sciences, 2021, 36(3): 336-348. (in Chinese)

8 侯瑞星, 欧阳竹, 刘振, 等. 环渤海“滨海草带”建设与生态草牧业发展路径. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 652-659.

Hou R X, Ouyang Z, Liu Z, et al. “Coastal Grass Belt” as paradigm for grass-based livestock husbandry around Bohai Bay. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(6): 652-659. (in Chinese)

9 李宏伟, 郑琪, 李滨, 等. 长穗偃麦草分子育种基础研究进展. 植物学报, 2022, 57(6): 792-801.

Li H W, Zheng Q, Li B, et al. Research progress on the aspects of molecular breeding of tall wheatgrass. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(6): 792-801. (in Chinese)

10 南志标, 王彦荣, 贺金生, 等. 我国草种业的成就、挑战与展望. 草业学报, 2022, 31(6): 1-10.

Nan Z B, Wang Y R, He J S, et al. Achievements, challenges and prospects of herbage seeds industry in China. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(6): 1-10. (in Chinese)

11 谷安琳. 耐盐碱栽培牧草——长穗薄冰草. 中国草地学报, 2004, 26(2): 9.

Gu A L. Cultivation of salt-tolerant forage grass—*Thinopyrum ponticum*. Chinese Journal of Grassland, 2004, 26(2): 9. (in Chinese)

12 赵树慧. 高产优质耐盐牧草——高冰草. 草原与草坪 1994, (3): 20-22.

Zhao S H. High yield and high quality salt-tolerant forage grass—Tall wheatgrass. Grassland and Turf, 1994, (3): 20-22. (in Chinese)

13 Dewey D R. Salt tolerance of twenty-five strains of *Agropyron*. Agronomy Journal, 1960, 52(11): 631-635.

14 Rogers A L, Bailey E T. Salt tolerance trials with forage plants in south western Australia. Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry, 1963, 3(9): 125-130.

15 Mcguire G E, Dvôrák J. High salt tolerance potential in wheatgrasses. Crop Science, 1981, 21(5): 702-705.

16 Shannon M C. Testing salt tolerance variability among tall wheatgrass lines. Agronomy Journal, 1978, 70(5): 719-722.

17 沈禹颖, 李昀, 阎顺国, 等. 河西走廊五种禾本科牧草早期耐盐性研究. 草地学报, 1999, 7(4): 293-299.

Shen Y L, Li Y, Yan S G, et al. Salt tolerance of early growth of five grass species in Hexi corridor. Acta Agrestia Sinica, 1999, 7(4): 293-299. (in Chinese)

18 Temel S, Keskin B, Simsek U, et al. Performance of some forage grass species in halomorphic soil. Turkish Journal of Field Crops, 2015, 20(2): 131-141.

19 彭运翔, 张力君, 于颖杰, 等. 偃麦草属植物种子和幼苗的耐盐性. 内蒙古草业, 2002, 14(3): 42-43.

Peng Y X, Zhang L J, Yu Y J, et al. Salt tolerance of seeds and seedlings of *Elytrigia*. Inner Mongolia Prataculture, 2002, 14(3): 42-43. (in Chinese)

20 Li H W, Li W, Zheng Q, et al. Salinity threshold of tall wheatgrass for cultivation in coastal saline and alkaline land. Agriculture, 2023, 13(2): 337.

21 Csete S, Stranczinger S, Szalontai B, et al. Tall wheatgrass cultivar Szarvasi-1 (*Elymus elongatus* subsp. *ponticus* cv. Szarvasi-1) as a potential energy crop for semi-arid lands of Eastern Europe// Nayeripour M, Kheshti M, eds. Sustainable Growth and Applications in Renewable Energy Sources. Landon: IntechOpen, 2011: 269-294.

22 Falasca S L, Miranda C, Alvarez S P. Agro-ecological zoning for tall wheatgrass (*Thinopyrum Ponticum*) as a potential energy and forage crop in salt-affected and dry lands of Argentina. Archives of Crop Science, 2017, 1(1):10-19.

23 Bennett S J, Barrett-Lennard E G, Colmer T D. Salinity and waterlogging as constraints to saltland pasture production: A review. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 349-360.

24 Taeb M, Koebner R M, Forster B P. Genetic variation for waterlogging tolerance in the Triticeae and the chromosomal location of genes conferring waterlogging tolerance in *Thinopyrum elongatum*. Genome, 1993, 36(5): 825-830.

25 Iturralde E M, Berone G D, Striker G G, et al. Anatomical, morphological and growth responses of *Thinopyrum ponticum* plants subjected to partial and complete submergence during early stages of development. Functional Plant Biology, 2020, 47(8): 757-768.

26 Vergiev S. Tall Wheatgrass (*Thinopyrum ponticum*): Flood resilience, growth response to sea water immersion, and its

capacity for erosion and flooding control of coastal areas. Environments, 2019, 6(9): 103.

27 García M G, Busso C A, Polci P, et al. Water relations and leaf growth rate of three *Agropyron* genotypes under water stress. Biocell, 2002, 26(3): 309-317.

28 Borrajo C I, Sánchez-moreiras A M, Reigosa M J. Morpho-physiological responses of tall wheatgrass populations to different levels of water stress. PLoS One, 2018, 13: e0209281.

29 张睿，封晓辉，吴玉洁，等. 长穗偃麦草（*Thinopyrum ponticum*）幼苗对盐旱胁迫的生理响应. 中国生态农业学报, 2022, 30(11): 1795-1806.

Zhang R, Feng X H, Wu Y J, et al. Interactive effects of drought and salt stresses on the growth and physiological characteristics of *Thinopyrum ponticum*. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(11): 1795-1806. (in Chinese)

30 Bahrani M J, Bahrami H A, Haghighi A A. Effect of water stress on ten forage grasses native or introduced to Iran. Grassland Science, 2010, 56(1): 1-5.

31 Porensky L M, Davison J, Leger E A, et al. Grasses for biofuels: A low water-use alternative for cold desert agriculture?. Biomass and Bioenergy, 2014, 66: 133-142.

32 Nazli R I, Kusvuran A, Tansi V, et al. Comparison of cool and warm season perennial grasses for biomass yield, quality, and energy balance in two contrasting semiarid environments. Biomass and Bioenergy, 2020, 139: 105627.

33 Dickeduisbeg M, Laser H, Tonn B, et al. Tall wheatgrass (*Agropyron elongatum*) for biogas production: Crop management more important for biomass and methane yield than grass provenance. Industrial Crops and Products, 2017, 97: 653-663.

34 Jensen K B, Pearse G, Larson S R, et al. ‘AlkarXL’, a new tall wheatgrass cultivar for use on saline semiarid lands. Journal of Plant Registrations, 2020, 14(3): 298-305.

35 Ruf T, Emmerling C. Site-adapted production of bioenergy feedstocks on poorly drained cropland through the cultivation of perennial crops. A feasibility study on biomass yield and biochemical methane potential. Biomass and Bioenergy, 2018, 119: 429-435.

36 Phillips W A, Northup B N, Venuto B C. Dry matter intake and digestion of perennial and annual cool-season grasses by sheep. The Professional Animal Scientist, 2009, 25(5): 610-618.

37 Ricci P, Romera A, Burges J C, et al. Case study: Precision and accuracy of methodologies for estimating in vitro digestibility of *Thinopyrum ponticum* (tall wheatgrass) hay and haylage fed to beef cattle. The Professional Animal Scientist, 2009, 25(5): 625-632.

38 Vogel K P, Moore K J. Forage yield and quality of tall wheatgrass accessions in the USDA germplasm collection. Crop Science, 1998, 38(2): 509-512.

39 Jafari A A, Anvari H, Nakhjavan S, et al. Effects of phenological stages on yield and quality traits in 22 populations of tall wheatgrass *Agropyron elongatum* grown in Lorestan, Iran. Journal of Rangeland Science, 2010, 1(1): 9-16.

40 马振宇. 偃麦和雀麦等属牧草经济性状与营养成份的研究. 中国草地学报, 1986, (2): 48-51.

Ma Z Y. An investigation on the economic characteristic and nutrient components of grasses. Chinese Journal of Grassland, 1986, (2): 48-51. (in Chinese)

41 Tong C Y, Yang G T, AoenBolige, et al. Screening of salt-tolerant *Thinopyrum ponticum* under two coastal region salinity stress levels. Frontiers in Genetics, 2022, 13: 832013.

42 Robertson J H. Penetration of roots of tall wheatgrass in wet saline-alkali soil. Ecology, 1955, 36(4): 755-757.

43 Srivastava N. Reclamation of saline and sodic soil through phytoremediation// Shukla V, Kumar N, eds. Environmental Concerns and Sustainable Development. Singapore: Springer, 2020: 298-299.

44 Díaz F J, Grattan S R. Performance of tall wheatgrass (*Thinopyrum ponticum*, cv. ‘Jose’) irrigated with saline-high boron drainage water: Implications on ruminant mineral nutrition. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 131: 128-136.

45 Cun G S, Robinson P H, Benes S E. Bioavailability of selenium in ‘Jose’ tall wheatgrass (*Thinopyrum ponticum* var ‘Jose’) hay as a substitute for sodium selenite in the diets of dairy cattle. Science of the Total Environment, 2015, 518/519:

159-167.

46 Rév A, Tóth B, Solti Á, et al. Responses of Szarvasi-1 energy grass to sewage sludge treatments in hydroponics. Plant Physiology and Biochemistry, 2017, 118: 627-633.

47 Yang H, Wong J W, Yang Z M, et al. Ability of *Agrogyron elongatum* to accumulate the single metal of cadmium, copper, nickel and lead and root exudation of organic acids. Journal of Environmental Sciences, 2001, 13(3): 368-375.

48 Fuller R D, Nelson E, Richardson C. Reclamation of red mud (bauxite residues) using alkaline-tolerant grasses with organic amendments. Journal of Environmental Quality, 1982, 11(3): 533-539.

49 Ciria C S, Sastre C M, Carrasco J, et al. Tall wheatgrass (*Thinopyrum ponticum* (Podp)) in a real farm context, a sustainable perennial alternative to rye (*Secale cereale* L.) cultivation in marginal lands. Industrial Crops and Products, 2020, 146: 1-8.

50 Trammell M A, Butler T J, Word K M, et al. Registration of NFTW6001 tall wheatgrass germplasm. Journal of Plant Registrations, 2016, 10(2): 166-170.

51 Scordia D, Papazoglou E G, Kotoula D, et al. Towards identifying industrial crop types and associated agronomies to improve biomass production from marginal lands in Europe. GCB Bioenergy, 2022, 14(7): 710-734.

52 Trammell M A, Hopkins A A, Butler T J, et al. Registration of ‘Plainsmen’ tall wheatgrass. Journal of Plant Registrations, 2021, 15(3): 415-421.

53 Lawrence T. Orbit, tall wheatgrass. Canadian Journal of Plant Science, 1967, 47(5): 611-612.

54 Lawrence T. Registration of Orbit tall wheatgrass. Crop Science, 1977, 17(6): 980.

55 Smith K F. Tall wheatgrass (*Thinopyrum ponticum* (Podp.) Z.W. Liu + R.R. C. Wang): A neglected resource in Australian pasture. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1996, 39(4): 623-627.

56 Borrajo C I, Sánchez-Moreiras A M, Reigosa M J. Ecophysiological responses of tall wheatgrass germplasm to drought and salinity. Plants, 2022, 11(12): 1548.

57 汪文佳, 宋运贤, 胡伟娟, 等. (小麦×长穗偃麦草) F_1与长穗偃麦草生物量积累相关性状的比较. 草业科学, 2020, 37(9): 1821-1832.
Wang W J, Song Y X, Hu W J, et al. Comparison of biomass accumulation related traits in (common wheat×tall wheatgrass) F_1 and its parents. Pratacultural Science, 2020, 37(9): 1821-1832. (in Chinese)

58 王天威, 曹艳红, 杨果, 等. 乳酸菌对青贮品质及草食家畜健康的影响. 中国科学： 生命科学, 2020, 50(9): 927-938.
Wang T W, Cao Y H, Yang G, et al. Effects of lactic acid bacteria on the quality of silage and health of ruminants. Scientia Sinica Vitae, 2020, 50(9): 927-938. (in Chinese)

Industrialization of Tall Wheatgrass for Construction of "Coastal Grass Belt"

LI Hongwei[1] ZHENG Qi[1] WANG Jianlin[1] SUN Hongyong[1] ZHANG Kexin[1] FANG Hongman[1] XING Xuerong[1] YANG Weicai[1] CAO Xiaofeng[1] LIU Xiaojing[2] JING Haichun[3] CHONG Kang[3] LI Zhensheng[1*]

（1 Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2 Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China;
3 Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China）

Abstract Tall wheatgrass (*Elytrigia elongata*) is a perennial cool-season bunchgrass with high productivity and tolerance to salt and alkali, waterlogging, and drought. Since first introduced into China in 1950s, tall wheatgrass has long been used as a wild parent for distant hybridization with wheat (*Triticum aestivum*). During 1980s—1990s, a few tall wheatgrass varieties were introduced to China as forage grass, nonetheless, currently they are still not widely cultivated and no variety was certificated. In 2020, Zhensheng Li put forward a proposal to construct "Coastal Grass Belt" on saline and alkaline soils in the Circum-Bohai sea region, which provides an opportunity for the industrialization of tall wheatgrass in China. This paper introduces the background, main characteristics, history and status of tall wheatgrass and put forward suggestions for industrialization of tall wheatgrass in China. In order to promote utilization of tall wheatgrass in China, the authors suggested constructing demonstration models of "Coastal Grass Belt" and demonstration farms for livestock in the "Coastal Grass Belt" targeted area. Leading companies should be fostered to form a complete industrial chain of "leading companies + professional cooperatives/ large growers". In addition, basic research, breeding, and seed industrialization should be carried out and accelerated. Meantime, policy and funds from government's support should also be considered. "Coastal Grass Belt" can not only solve the shortage of high-quality forage grass in China, but also establish ecological barrier and protect the ecological environment.

Keywords tall wheatgrass, saline and alkaline land, Coastal Grass Belt, food security, forage security

李宏伟 中国科学院遗传与发育生物学研究所副研究员。主要研究领域：长穗偃麦草产业化与“滨海草带”。E-mail: hwli@genetics.ac.cn

LI Hongwei Associated Professor of Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on industrialization of tall wheatgrass for construction of "Coastal Grass Belt". E-mail: hwli@genetics.ac.cn

李振声 中国科学院院士，中国科学院遗传与发育生物学研究所研究员。主要研究领域：长穗偃麦草与小麦远缘杂交及“滨海草带”研究。E-mail: zsli@genetics.ac.cn

LI Zhensheng Academician, Chinese Academy of Sciences (CAS). Professor of Institute of Genetics and Developmental Biology, CAS. His research focuses on distant hybridization between tall wheatgrass and wheat, and "Coastal Grass Belt", etc. E-mail: zsli@genetics.ac.cn

■责任编辑：文彦杰

*Corresponding author